

Kísérlet a szintezőléc-kalibrálás megvalósítására

Ács Ágnes Mária – Égető Csaba – Rózsa Szabolcs

DOI: <https://doi.org/10.30921/GK.70.2018.5.5>

Bevezető

A minőségre való törekvés szakmáinkkal egyidős. Törekedünk erre, amikor méréseinket két távcsőállásban végezzük el, vagy amikor a szintezéseket oda-vissza irányban hajtjuk végre. A különböző mérési eljárásokon túl akkor tudunk minél pontosabb eredményt elérni, ha a mérést rendszeresen kalibrált eszközökkel végezzük.

Ha a szintezésről beszélünk, kétféle kalibrációs módszer létezik, a léckalibráció és a rendszerkalibráció (Woschitz 2003). Előbbi egymástól függetlenül kezeli a szintezőműszert és a szintezőlécet; a kalibrálás során csak a lécen található osztások hibáit tanulmányozza. Ezen kívül vizsgálendő minden olyan egyéb hatás, amely befolyásolja mérési eredményeinket, mint például a léczalponi hibája, sérülések, kopások, lécvetemedések stb. A rendszerkalibráció esetén a két főkomponens, azaz a műszer és a lécz együttesen kerül kalibrálásra, így jobb képet kaphatunk a szintezés várható pontosságáról. Ez esetben nem a lécosztásokat, hanem a műszerben előállt magasságértékeket vizsgálják.

Egy másik lehetséges szempont a kalibrációs módszerek csoportosítására a szintezőléc mozgatása alapján történhet. Lehetséges a lécz függőleges mozgatása a kalibráció során, amelyre jó példa a Grazi Műszaki Egyetem kalibráló laboratóriuma (Woschitz-Brunner 2002). A módszer hátránya, hogy kis belmagasságú helyiségek esetében földemáttöréseket kell alkalmazni. A gyakorlatban alkalmazott másik módszer a horizontális mozgatás, mely egyszerűbben kivitelezhető, viszont ez esetben gondoskodni kell a műszerhorizont 90 fokos megtöréséről (Heister 2002). Ilyen rendszer valósult meg a Münchener Egyetemen is.

Míg az egyes laboratóriumok kivitelezése nagyban eltérhet egymástól, addig az alkalmazott alapelv mindenhol megegyezik. Léckalibráció esetén a lécz osztásait vagy a rendszer méréseit egy nagy pontossággal meghatározott

távolságértékkel hasonlítják össze. Erre legalkalmasabb az interferencián alapuló távolságváltozás-mérés, amellyel megfelelő körülmények között a mikrométer alatti pontosság is elérhető. Az úgynevezett interferométerek mára szinte elengedhetetlen elemei lettek bármely nagy pontosságú műszer kalibrálásának. A léckalibráció másik fontos kelléke a nagy felbontású CCD-kamera, avagy digitális mikroszkóp, amely szükséges az osztások pontos detektálásához.

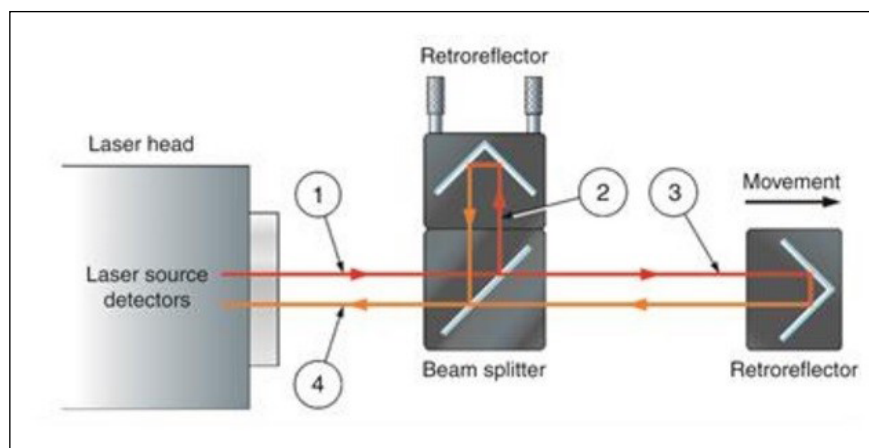
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános és Felsőgeodézia Tanszék hallgatójaként lehetőséget kaptam arra, hogy a tanszék eszközeit felhasználva megcélazzam egy léckalibrációra alkalmas laboratórium összeállítását, mindezzel tapasztalatot szerezve a mérések hibaforrásairól és a leküzdendő nehézségekről.

A mérésekhez felhasznált eszközök

A mérési eljárás legfontosabb eleme az Albert Michelson által feltalált interferométer, amelynek működési elvét az 1. ábra szemlélteti. A kép bal oldalán található lézerforrás (laser head) egy olyan koherens lézernyalábot állít elő, amelynek hullámhossza nagy pontossággal ismert. Ez a nyaláb az 1-es útvonalon eléri az interferométer-tükört (beam splitter), amely nem más, mint egy félig áteresztő tükör. Így a rá

eső lézernyaláb részben megtöri, és a 2-es útvonalon haladva egy sarokprizmához érkezve onnan a beesési irányával párhuzamosan visszaverődik. Ez a prizma (retroreflector) a mérés során mozdulatlan marad, amely a jelen esetben a félig áteresztő tükörhöz való erősítéssel biztosított. A lézernyaláb másik része a 3-as útvonalon haladva egy, az előbbihez nagyban hasonló prizma felé halad, ami csupán annyiban különbözik, hogy a mérés során a mozgást végző testtel együtt mozog. A két visszaverő prizmáról érkező nyaláb az interferométer-tükörön újra egyesül, és a 4-es jelzett útvonalon a lézerforrás detektorához érkezik. A két sugár közül annak fázisa, amely a mozdulatlan prizmáról verődött vissza, nem változik. Viszont a mozgó prizmáról visszaverődött jel fázisa annak elmozdulásával arányosan változik. A fáziskülönbség interferenciát okoz, amelyből ki lehet számolni a mozgó prizma, azaz közvetve a mozgó test távolságváltozását.

Az egyetem egy Renishaw XL-80 típusú interferométerrel rendelkezik, amelynek része (a fent ismertetett rendszeren felül) egy környezeti szenzor is. Az XC-80 szenzor a lézer hullámhosszát befolyásoló tényezőket (hőmérséklet, légnyomás és páratartalom) regisztrálja, és azok ismeretében korrigálja a mért távolságokat. Ha ezeket nem vennénk figyelembe, akkor az interferométer pontossága csupán $\pm 20\text{--}30\text{ }\mu\text{m/m}$, míg bekapcsolt környezeti korrekciókkal



1. ábra. Az interferométer működési elve (Renishaw nyomán)

elérhető a $\pm 0,5$ ppm, azaz egy méter hosszon $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (XL-80 Brochure).

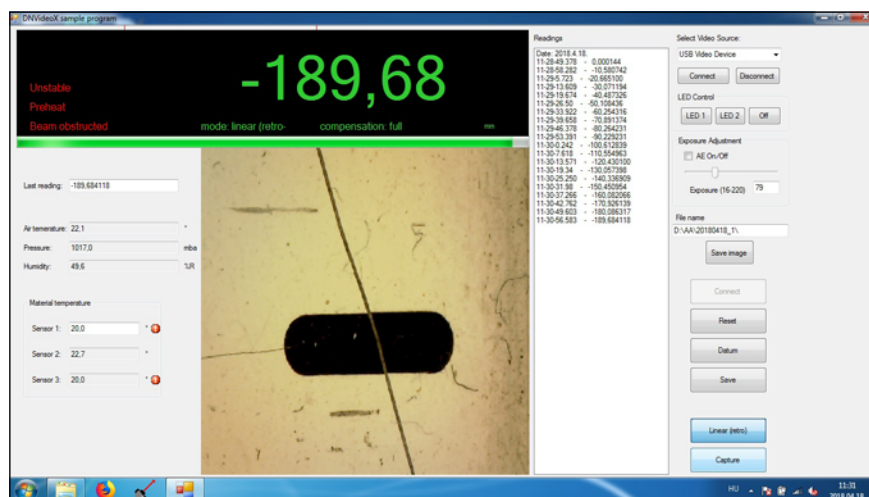
A mérések során a digitális mikroszkóp tölti be az index szerepét. Ahhoz, hogy az így kapott információkat felhasználhassuk, szükséges a pixel métrikus, „terepi” mérete, ami a nagyítás mértékétől függ. Ez könnyen megállapítható az interferométer segítségével. Ha a léce egyik osztásáról képet készítünk a CCD-kamerával, majd a léce elmozdítva és annak elmozdulását mérve, az azonos pontok két kép közötti, pixelben mért távolságából meg lehet állapítani a pixel métrikus méretét. Így logikusan következik két alapkövetelmény a digitális mikroszkóppal szemben: a nagy képfelbontás és a rögzíthető fókusz. Az általam használt szenzor egy Dino-Lite digitális mikroszkóp, mely 1,3 megapixel (1280 × 1024 pixel) és a nagyítási mértéke 10–90 között állítható.

Szoftveres háttér

Mind a lézer-interferométer, mind a mikroszkóp működtetéséhez szükséges egy-egy szoftver. A lécekalibráláshoz kapcsolódó mérések megkövetelik, hogy az adott osztásról közel azonos időpillanatban készüljenek interferometrikus távmérések és képfelvételek is.

Ezt megoldandó, egy olyan programra volt szükségünk, ami egy gomb lenyomásával mindkét eszköznek utasítást küld a megfelelő mérések végrehajtására. Erre a célra megkaptuk mind a Renishaw, mind a Dino részéről a szoftverfejlesztő készleteket, az SDK-kat. Az előbbihez tartozó program az DX10 címet viseli, míg a kamera programja a DNSample. Mindkettő C++ nyelven íródott, így a Microsoft Visual Studio segítségével el lehetett készíteni a két szoftver egymásba gyúrt változatát.

A program mérés közbeni állapotát mutatja a 2. ábra. A bal felső fekete háttérrel rendelkező rész mutatja az interferométer leolvasását (a példában -189,68 mm), illetve egyéb paramétereket, mint például a leolvasás mértékegysége, vagy a mérési mód. Az alatta található zöld csík a lézer jelerősségét jellemzi. A bal oldalon találhatók ezen kívül az XC-80 által mért környezeti paraméterek, ahol a három testhőmérséklet-mérő egység közül csak egyet alkalmaztunk, így a másik két



2. ábra. A kalibrációszoftver felépítése

szenzornál erre piros felkiáltójellel figyelmeztet a program. Középen található a kamera aktuális képe, gyengített felbontásban. A „Readings” felirat alatt olvashatók az eddig mért távolságok és a hozzájuk tartozó időbélyegek (dátum és idő). Az ablak jobb oldalán találhatók az egyéb beállítási lehetőségek, mint például a kamera fényeinek állítása, az elkészült mérések mentési könyvtára és a mentés gomb is. Utóbbi a mérés befejeztével egy fájlban rögzíti az interferometrikus távolságokat az általunk megadott könyvtárban. A „Capture” gomb segítségével egyrészt az adott leolvasási értékkel bővítjük a „Readings” listát, illetve ezzel egyidejűleg az adott időbélyeggel ellátott JPEG-kép készül az adott könyvtárban.

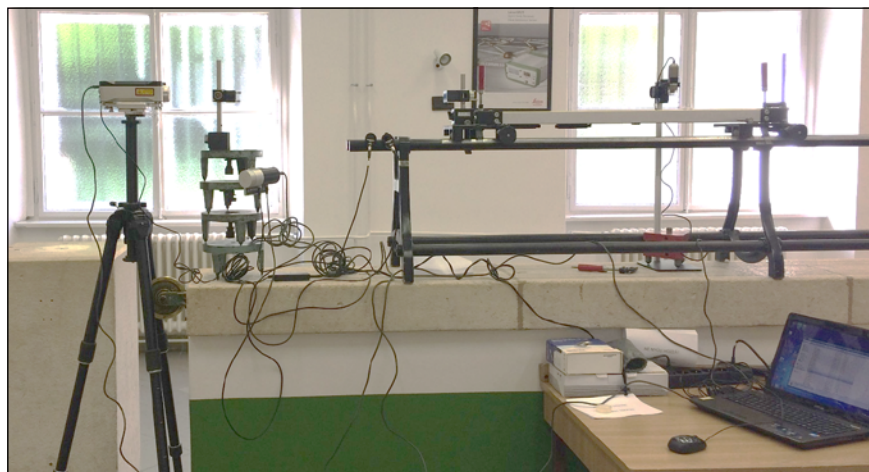
A mérés menete

A mérés megvalósításához szükség volt még egy olyan fizikai eszközre,

amely képes egyenes vonalban vezetni a vizsgált léce. A tanszéken található egy erre alkalmas szerkezet, amely két szálon vezet egy-egy kocsit, amelyek három-három görgős talppal fekszenek fel a két sínre. A vezető mindazonáltal nem mindenhol lineáris, olykor kigyózásokat lehet észrevenni akár szabad szemmel is, amelyek nagyban megnehezítették az interferométer pontos beállítását. Emellett jelenleg csupán a méteres és annál rövidebb lécek vizsgálatára alkalmas.

A tényleges mérési összeállítás az ismertetett lineáris vezetőből, az interferométerből, annak tartozékai, a kamerából és állványából, illetve a léce rögzítéséhez szükséges szorítók, áll. Ezt mutatja be a 3. ábra.

Első lépésként a léce párhuzamosságát kell biztosítani, majd a kamera fókuszának gondos beállítása következik. Ezek után a pixel tárgyi mérete már meghatározható, amennyiben egy



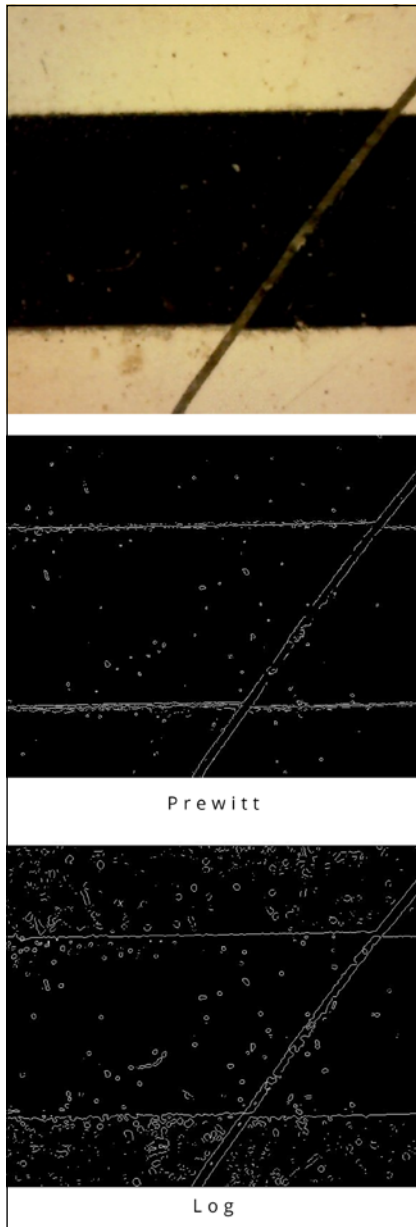
3. ábra. A mérési felszerelés

osztásról két pozícióban is készítünk képet, és a pozíciók közötti elmozdulást az interferométerrel megmérjük. A pixel metrikus valódi mérete a következőképpen számítható (1):

$$p = \frac{i_2 - i_1}{k_2 - k_1} \quad (1),$$

ahol i_1 és i_2 az interferométerrel mért értékek mm-ben, míg k_1 és k_2 az él helyzete a képen pixel-ben. Ha a mérést többször megismételjük, akkor a pixel terepi méretének középhibája is meghatározható.

A kalibrációhoz szükséges mérések során a lécz teljes hossza mentén kellett képeket készíteni az adott osztásokról és mérni a hozzájuk tartozó interferometrikus távolságokat a



4. ábra. Az éldetektáló-algoritmuskok eredménye

szoftver segítségével. A feldolgozásukat külön végeztük el a Matlab segítségével, de tervben van ennek átültetése OpenCV C/C++ környezetbe.

A feldolgozás során a legfontosabb lépés az élék helyének pontos detektálása. A Matlab-ban található edge parancsot használtuk ehhez, ahol több algoritmus közül lehet választani. Az ezek közötti különbséget szemlélteti a 4. ábra. Egy régebbi típusú centiméteres osztású lécz esetében a Prewitt-módszer szinte csak a valós éleket ismeri fel, viszont azokat elmosódottan, több pixel széles sávban. A Log módszer sokkal zajosabb eredményt ad, viszont a tényleges élék sokkal élesebben, egy pixel széles vonalként jelentkeznek. A későbbiekben ezt a módszert alkalmaztuk, mivel így pontosabb éldetektálást várhattunk el.

Az edge parancs csak azon pontok halmazát határozza meg, amelyek nagy valószínűséggel élpontok, így egy külön lépésben kell meghatározni az éleket alkotó vonalak egyenletét. Mivel a mérések nagyon zajosak, nem lehet a legkisebb négyzetek módszerével megoldani a problémát. Egy olyan módszerre volt szükségünk, aminek magas az összeomlási pontja, azaz durva hibákra kevésbé, vagy egyáltalán nem érzékeny. A RANSAC-eljárást alkalmaztuk a feldolgozásban, ami egy iteratív robosztus, nem determinisztikus becslés (Zuliani 2011). Az eljárás általánosan alkalmazható, akár egyenes illesztésére is. Első

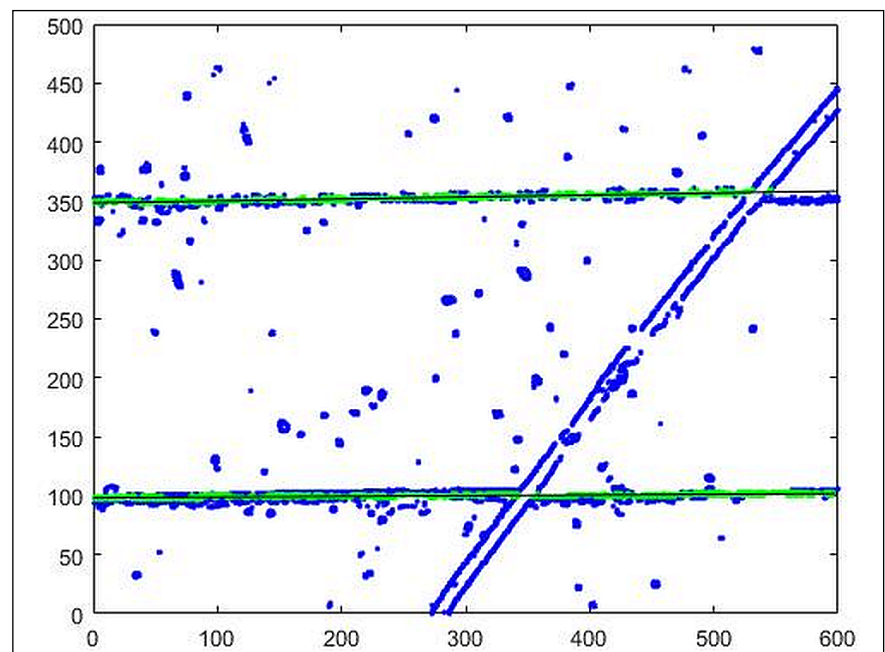
lépésként az adathalmazból véletlenszerűen kiválasztott két pontra egyenest illesztünk. Ezután megvizsgáljuk az összes adat illeszkedését a modellhez, illetve egy adott hibaküszöbön belül az egyeneshez közel eső pontok számát. Ezek a pontok alkotják az ún. konszenzushalmazt. Ezt a három lépést ismételjük meg kellően nagy számban, majd azt az adathalmazt (azaz a konszenzushalmazt) tartjuk meg, amely a legtöbb elemből áll. Kellően sok iteráció után a durva hibák nagy valószínűséggel kiszűrhetők. Az 5. ábra a RANSAC-eljárás eredményét mutatja be.

A képen kékkel vannak megjelenítve azok a pixelek, amik az edge algoritmus alapján élhez tartoznak és zölddel, amik a RANSAC-eljárás után egy egyenesre esnek.

Ha az eljárás végén a végleges konszenzushalmazt kivesszük a vizsgálandó adathalmazból és újra lefuttatjuk a RANSAC-becslést, akkor egy képen akár további éleket is képesek vagyunk detektálni. Ezt nevezzük sorozatos RANSAC-nek, aminek eredményeképp az osztás mindkét élét detektálni lehet egy képen.

Végezetül, ha ezekre a kapott konszenzushalmazokra a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztünk, megkapjuk az élék egyenletét is. Ezeket jelöltem az 5. ábrán fekete vonallal.

A későbbi felhasználáshoz az él helyzetét egyetlen számértékként kell



5. ábra. A RANSAC-eljárás eredménye

kezelni, mintegy leolvasásként a kép széléhez képest. Ezért egy adott szelvényben (kb. a kép középvonalában) képeztem az egyenes értékét a következő módon: $k=k(x)=mx+b$ (2).

A mérések kiértékeléséhez szükséges még az adott képhez tartozó, az interferométer által mért távolság, amiből: $l=i-k$ (3).

Ez esetben i az interferometrikus távolság mm-ben, és k az él helyzete a képen mm-re átválta a pixelméret segítségével. Két osztás távolsága végezhető: $t=l_i-l_{i-1}$ (4).

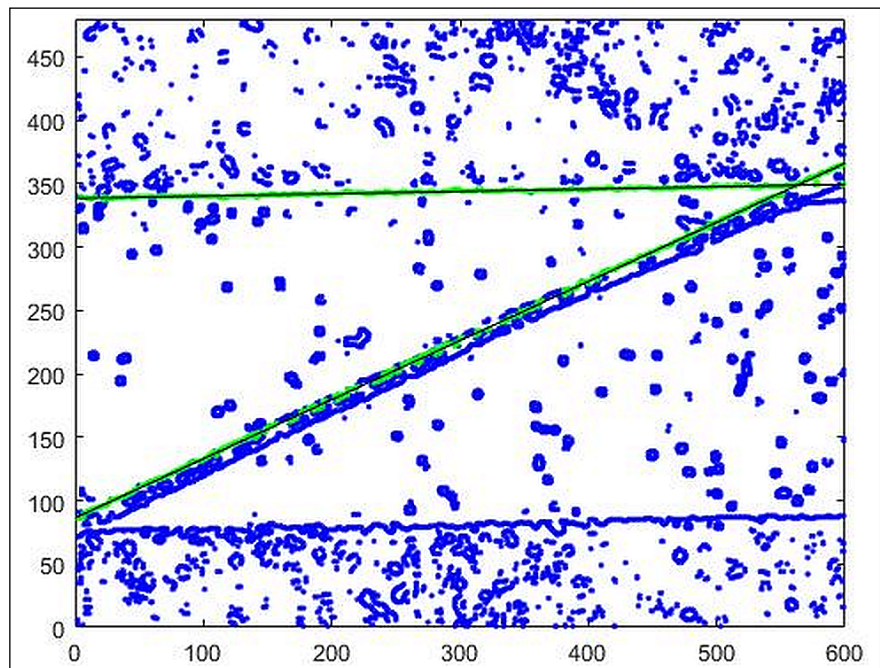
Hagyományos cm-osztású lécek esetén, mivel az osztás közepe közvetlenül nem meghatározható, a két él átlagából képezhető a középhelyzet.

Eredmények

Tesztelésképp két szintezőlécen végeztem el a vizsgálatokat. Az egyik egy régebbi típusú, hagyományos centiméteres beosztású felsőrendű Wild-léc, a másik pedig egy újabb, Leica/NEDO vonalkódos osztású lécek. Előbbiről készült a 4. és 5. ábra, amin látható, hogy a repedéshez hasonló hibák eléggé megnehezítették az automatikus feldolgozást. Sokszor a RANSAC-eljárás az egyik élt tévesen azonosította, és az egyik törésvonalat detektálta egyenesként, ahogy az a 6. ábrán látható. Ezeket a hibákat egyesével, manuálisan kell kijavítani, bár az automatizálásra megvan a lehetőség, például egy adott küszöbértéket meghaladó meredekségű éleket elvetve. Emellett az egy képen detektált élék távolságának vizsgálata is célravezető, hiszen ennek közel konstansnak kell lennie. Ez utóbbit alkalmaztuk is a feldolgozáskor.

Mindazonáltal az ismételt mérésekkel kapott eredmények igen nagy szórást mutatnak, így az ez irányú kalibráció még kutatásra szorul. A fő gondot egyrészt a töredezett festés jelenti, ami miatt egy élre sok esetben több egyenes is illeszthető. A másik gondot a felfestés technológiája jelenti, ami miatt mára az élék elmosódottak, ezért nehéz kellő bizonyossággal helyzetüket megállapítani.

A vonalkódos lécek esetében, főleg a modernebb gyártási technológia (Nedo-féle gyártási technológia)

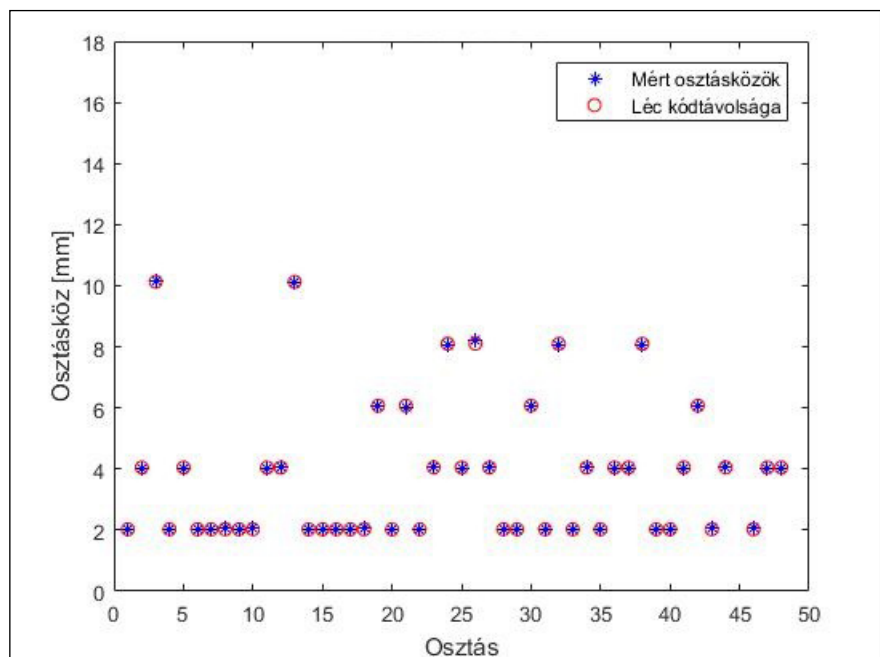


6. ábra. Félreazonosítás

miatt, az éleket minden egyes esetben nagy pontossággal lehetett meghatározni. Emellett viszont gondot jelentett, hogy a lécek kódolása nem volt ismert számunkra, csupán az, hogy 2,025 mm-es szakaszokból és azok többszöröséből épül fel (Woschitz 2003). A pontos kódtávolságok ismerete nélkül nem lehet a lécek hibáit meghatározni, így elsősorban a mérésekből először ezeket határoztuk meg. Ha a mért osztásköz valamekkora hibaküszöbvel egy adott $n \times 2,025$ mm-es távolságnak felel meg, akkor a lécek kódolása

ott ezzel egyenértékű. A 7. ábrán a mérés során kapott elméleti kódtávolságokat ($n \times 2,025$ mm) és a tényleges mért távolságokat lehet megtekinteni, melyeknek a különbsége a keresett hiba.

Az ismételt mérések a Wild-lécet képest már jobb eredményt adtak, viszont itt is tapasztalhatók nagyobb középhibával rendelkező osztások. Ezeket mutatja be a 8. ábra, ahol fekete vonallal lettek ábrázolva az adott osztáshoz tartozó hibaértékek átlagai, illetve pirossal az ebből levezetett szórások. A



7. ábra. Leica-szintezőléc kódolása és a mért osztásközök

legjobb esetben a szórás csupán $1,4\mu\text{m}$ (9. osztás), de ezen kívül is találhatók kedvező pontosságú eredmények.

Ezen nagy középhibák magyarázatául szolgálhat az általunk használt lineáris vezető pontatlansága. A korábban említett „S” görbület nagyban megnehezítette az interferométer méréseit, és más hatása is volt. Ezen a szakaszon ugyanis a lécz nem párhuzamosan mozog a lézernyalábhoz képest, így a tényleges elmozdulás és az interferométerrel mért elmozdulás eltérnek egymástól. Emellett ha a lécz elfordul a mérés során, akkor a kamerképeken meghatározott egyeneseken végzett leolvasás is megváltozik valamilyen irányba. Másik hibaforrás a mozgatót biztosító kocs oldalirányú elmozdulása, ami nem csak a képről vett leolvasást befolyásolja, hanem az interferométer méréseiben is változást idéz elő.

Következtetés

A mérési eredményekből és a mérés közben tapasztaltakból arra következtünk, hogy a módszer alkalmas kellően nagy pontosságú kalibráció elérésére. Ennek egyetlen akadályálya a jelenlegi lineáris vezető, amely a további kutatásokhoz nem alkalmas eszköz. Pontosságbéli javulás csupán egy precízebb mozgatóeszközzel lehetséges, amit célszerű ezen esetben léptetőmotorral

felszerelni és így a mérést is automatizálni. Ezen túl érdemes lehet a rosszabb minőségű Wild-léc esetében az éldetektáláshoz esetleg más technikákat megvizsgálni, mint például a korrelációs számítás módszerét.

Összességében haladási irányunk helyes, a többségében jó eredmények megerősítene bennünket módszerünk helyességében.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni az Új Nemzeti Kiválósági Programnak, hogy lehetőségem volt elvégezni ezt a kutatást, így ebből hasznos tudásra tehettem szert, és a tapasztalatokat átadhatam másoknak.

Szeretném megköszönni a segítséget két tanáromnak: dr. Égető Csabának és dr. Rózsa Szabolcsnak, akik nagyban támogatták munkámat.

Irodalom

- Heister, H. 2002. Zur Kalibrierung von digitalen Nivelier-System. AVN11-12/2002 pp. 380–385.
- Woschitz, H. 2003. *System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results*. Shaker Verlag, Technische Universität Graz
- Woschitz, H. – Brunner, F. K. 2002. System Calibration of Digital Levels – Experimental Results of Systematic Effects. In Kopáčík A – Kyrinovič P (eds): *INGEO2002, 2nd Conference of Engineering Surveying*. Bratislava. pp. 165–172.

- Zuliani, M. 2011. *RANSAC for Dummies* <http://www.cs.tau.ac.il/~turkel/imagepapers/RANSAC4Dummies.pdf> utolsó elérés: 2018. szeptember 9.
- Renishaw <http://www.renishaw.hu> utolsó elérés: 2018. szeptember 9.
- XL-80 Brochure (English)

Summary

In my thesis I present the methods of calibration of levelling staffs. The main devices were an interferometer and a CCD sensor during the calibration. The interferometers became the standard for length measurements and the CCD sensors are used to detect the position of the graduation lines. Besides that I present the calibration software, which controls both instruments. Furthermore I introduce the image processing methods I used to detect the lines. At last I present our results and future plans.

Kulcsszavak: szintezőléc, léczkalibráció, rendszerkalibráció

Keywords: levelling staffs' calibration, system calibration



Ács Ágnes Mária
MSc egyetemi hallgató

BME Építőmérnöki Kar
földmérő szakirány
acs.agnes@outlook.com



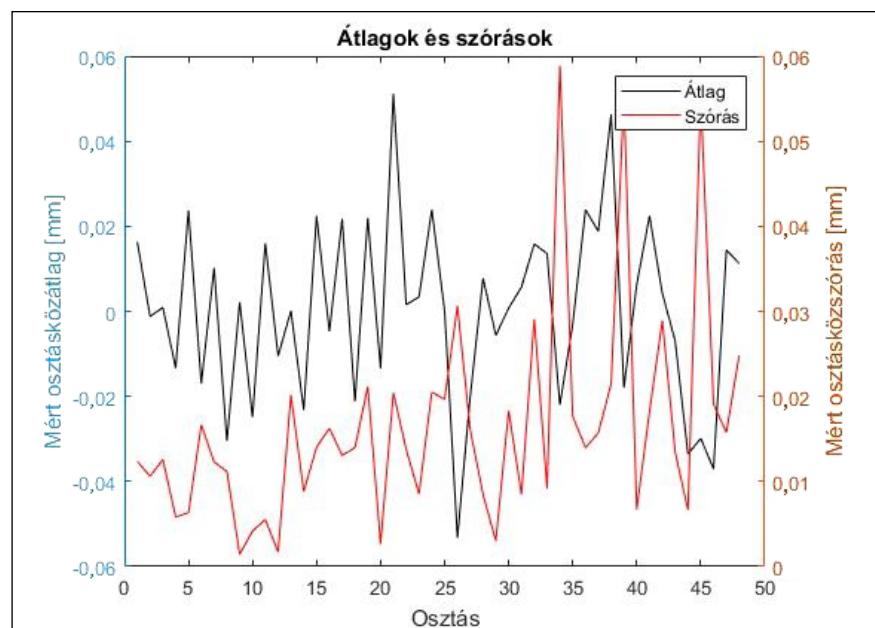
Dr. Égető Csaba
adjunktus

BME Általános és Felsőgeodézia
Tanszék
egeto.csaba@epito.bme.hu



Dr. Rózsa Szabolcs
egyetemi docens

BME Általános és Felsőgeodézia
Tanszék
rozsza.szabolcs@epito.bme.hu



8. ábra. Leica-szintezőléc-re kapott eredmények – a baloldalon a mért osztásközök hibája, míg a jobb oldalon az azokhoz tartozó középhibák értékei láthatóak